

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Frézování nakloněným nástrojem

Milling by Means of Tilt of Milling Tool

Student:

Jiří Beran

Vedoucí bakalářské práce

Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Beran**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Frézování nakloněným nástrojem**
Milling by Means of Tilt of Milling Tool

Zásady pro vypracování:

1. Přehled současného stavu frézování tvarových ploch.
2. Zhodnocení a rozbor frézování tvarových ploch se zaměřením na parametry struktury povrchu.
3. Tvorba strukturních rovnic.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

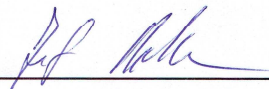
BÁTORA, B.; VASILKO, K.. *Obrobené povrchy – technologická dedičnost, funkčnost*. Trenčín: Trenčianská univerzita, 2000. s 183, ISBN 80-88914-19-1.
SADÍLEK, M. *Zvyšování efektivity obrábění s využitím CAD/CAM systému-Disertační práce*. Ostrava: Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 123 stran, 23 příloh.
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina: EDIS Žilina. 2007, 243s. ISBN 978-80-8070-711-8.
SADÍLEK, M.; ČEP R.; OTÁHAL, D. Vliv náklonu nástroje při frézování. *Odborná konference - Frézování IV*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007, s. 13 – 18. ISBN 80-214-3239-X.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010


prof. Dr. Ing. Josef Brychta
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19. 5. 2010

..... Jiří Beran
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 19. 5. 2010

..... Jiří Beran

Podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jiří Beran

Adresa trvalého pobytu autora práce: Myslechovice 73

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BERAN, J. *Frézování nakloněným nástrojem: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2010, Vedoucí práce: Sadílek, M.

V této práci se budeme zabývat drsností povrchu vznikající při frézování zaobleným nakloněným nástrojem. Nejprve jsou zde popsány nejdůležitější informace o frézování tvarových ploch. Především pro frézování kulovou frézou, která je při obrábění nakloněna o určitý úhel β_n . Experimenty byly prováděny na třech materiálech. Naměřené hodnoty drsnosti jsou rozděleny podle řezných podmínek a úhlů náklonu. Je zde popsán význam struktury povrchu se zaměřením na drsnost. V závěru byly navrženy rovnice, které sice přesně neodpovídají zadání a cíli, kterého jsme chtěli původně dosáhnout, ale lze u nich najít jistou návaznost k problematice a poslouží k dalšímu výzkumu.

ANNOTATION OF THESIS

BERAN, J. *Milling by Means of Tilt of Milling Tool: bachelor thesis*. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2010. Thesis, head: Sadilek, M.

This bachelor thesis deals with evaluation integrity milled surface by dispositioned spherical cutter. First we will describe basic informations about milling of contoured surfaces. There is a spherical tool, which is optimal for our experiments. Cutter is tilted angle-wise defined β_n . We tested integrity for 3 materials. There is described a value of integrity surface for mechanical industry. In this work we prefer surface roughness which we measured. In fine we suggested equations which do not reply our destinations, but we can find there some connections with our issue. It will be aplicated in other research.

Obsah bakalářské práce

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	7
1. ÚVOD	8
2. PŘEHLED FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH	9
2.1 DRUHY TVAROVÝCH FRÉZ.....	10
2.1.1 Frézování kulovou frézou	10
2.3 UPLATNĚNÍ HSC PŘI FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH.....	11
2.3.1 Definice HSC.....	11
3. FRÉZOVÁNÍ NAKLONĚNÝM NÁSTROJEM	12
3.1 NÁKLON NÁSTROJE O ÚHEL β_F	12
3.2 NÁKLON NÁSTROJE O ÚHEL β_N	13
3.3 POUŽITÍ 5-OSÝCH OBRÁBĚCÍCH CENTER	14
3.3.1 5-osé frézování polohováním	15
3.3.2 5-osé souvislé frézování	16
4. STRUKTURA POVRCHU	18
4.1 DRSNOST POVRCHU	19
4.2 HODNOCENÍ STRUKTURY FUNKČNÍCH PLOCH JAKO CELKU	20
4.2.1 Porovnávání měřených hodnot s tolerančními mezemi	21
4.2.2 Kontrola drsnosti dotykovými přístroji (dle ČSN EN ISO 4288).....	22
4.2.3 Zjednodušený postup pro kontrolu drsnosti	23
4.3 FUNKČNÍ VLASTNOSTI POVRCHU	24
5. VLIV FRÉZOVÁNÍ NAKLONĚNÝM NÁSTROJEM NA DRSNOST POVRCHU	25
5.1 REALIZACE EXPERIMENTŮ	25
5.2 ŘEZNÉ PODMÍNKY.....	27
5.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY	28
5.4 TVORBA STRUKTURNÍCH ROVNIC POMOCÍ METODY NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ	29
5.5 NESHODA NAMĚŘENÝCH HODNOT S VYPOČTENÝMI.....	36
6. ZÁVĚR.....	38
7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	40

Seznam použitých značek a symbolů

CAD	počítačem podporované konstruování	
CAM	počítačem podporovaná výroba	
CNC	počítačem číslicově řízený stroj	
HSC	vysokorychlostní obrábění	
NC	číslicově řízený stroj	
P	základní profil povrchu	[μm]
R	drsnost povrchu	[μm]
R_z	teoretická drsnost	[μm]
$R_{z_{\text{příč.}}}$	teoretická drsnost měřená v příčném směru	[μm]
$R_{z_{\text{podél.}}}$	teoretická drsnost měřená v podélném směru	[μm]
R_a	střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
W	vlnitost povrchu	[μm]
a_e	šířka řezu	[mm]
a_p	hloubka řezu	[mm]
d	průměr nástroje	[mm]
f_z	posuv na zub nástroje	[mm]
h	výška odebíraného materiálu	[mm]
l	délka	[mm]
n	otáčky nástroje (vřetena)	[min^{-1}]
β_f	úhel náklonu ve směru posuvu	[$^\circ$]
β_f	úhel náklonu k normále směru posuvu	[$^\circ$]
μ	aritmetický průměr parametru profilu drsnosti	[-]
σ	směrodatná odchylka hodnot	[-]

1. Úvod

Frézování tvarových ploch je nedílnou součástí obrábění. Tento typ frézování nám v dnešní době umožňuje vyrobit prakticky jakýkoli tvar součásti. Vysokou přesnost frézování nám zajišťuje použití moderních CAD/CAM systémů, díky nimž dokážeme naprogramovat obrobek i té nejsložitější součásti za krátkou jednotku času. Velký význam při tomto typu obrábění má volba používaného nástroje. V našem případě je to kulová fréza. Tento nástroj je universální především díky svému zaoblení. Tím nám umožní obrábět námi požadovaný tvar při svém nízkém opotřebením, vysokými rychlostmi, a při velkém úběru materiálu. Největší výhodou těchto fréz je hlavně v kvalitě obrobku povrchu a to zejména v jeho drsnosti. K dosažení lepší drsnosti nám výrazně pomáhá naklonění tohoto nástroje.

V této práci budeme této drsnosti věnovat zvláštní pozornost. Při naklonění působí na nástroj jiné řezné síly, než při frézování nástrojem, který je nastaven kolmo k obráběnému povrchu. Hlavní výhoda frézování pod určitým úhlem je v odstranění nežádoucích vlivů, které nám negativně ovlivňují obrábění. Především pak odstranění nulové řezné rychlosti v ose nástroje.

Při experimentech bylo frézováno 10 vzorků u 3 materiálů. Všechny vzorky se lišily řeznými podmínkami. Následně byly změřeny drsnosti povrchu. Každý vzorek byl obráběn pod 6 námi zvolenými úhly naklonění ($5 - 30^\circ$). Dle literatury [1] bylo prokázáno, že nejlepší drsnost vykazovaly vzorky frézované pod úhlem $15 - 20^\circ$. Frézování proběhlo ve 3 firmách. U každého vzorku tedy proběhlo 12 měření (R_a a R_z) tj. 120 hodnot drsnosti celkem. Z důvodu velkého množství dat budeme pracovat pouze s hodnotami R_z .

Naším úkolem bude pro tyto úhly naklonění nalézt vztah, který by vyjadřoval závislost drsnosti R_z na určitých řezných podmínkách. Toho se budeme snažit dosáhnout pomocí metody nejmenších čtverců, která byla použita u podobných výpočtů, avšak pro měření teploty řezu. Ta zde rostla s řeznou rychlostí. Platila zde tedy přímá závislost. V našem případě to bude poněkud složitější neboť změnou řezných podmínek a rostoucím náklonem má drsnost povrchu vždy jinou hodnotu. Tento fakt je popsán v závěru práce.

2. Přehled frézování tvarových ploch

Frézování je třískové obrábění různých součástí dvou a vícebřitým frézovacím nástrojem. Hlavní řezný pohyb (rotační) vykonává nástroj a vedlejší řezný pohyb (translační) vykonává obrobek na stole stroje, někdy tento pohyb vykonává také nástroj (např. konzolové frézky). [6]

Frézování má obrovské uplatnění při výrobě rovinných ploch u jednoduchých součástí, ale především při obrábění tvarových ploch složitých při dodržení přesnosti rozměru a jakosti výrobku. V posledních letech se rozmáhá výroba nespočetného množství součástek různých jednoduchých, ale i složitých tvarů. Nejlépe je tento pokrok vidět zejména v automobilovém průmyslu, proto má smysl zabývat se obráběním tvarových ploch. Tyto složité tvary dnes není prakticky možné vytvořit bez pomoci moderní výpočetní techniky, která zrychluje a zefektivňuje výrobu počínaje návrhem tvarově složitých součástí přes navržení její výroby až po vlastní výrobu součásti. Mezi nejvíce používané tvarově složitě součásti patří: lodní šrouby, vrtule, lopatky oběžných kol, lopatková kola turbín, vačky, šablony, lisovací formy, zápustky, atd.

Tvarové plochy nejrůznějších tvarů se vyskytují zejména v automobilovém, leteckém a lodním průmyslu, dále např. u vodních elektráren a v neposlední řadě také u tvářecích strojů. Tvarové plochy lze obrábět, co se týče frézování, třemi základními způsoby:

- Kopírováním,
- použitím NC techniky,
- Tvarovými frézami.

Pro stále větší zájem o frézování kulovým nástrojem bylo vynalezeno ponorné frézování. Jeho úkolem je především odstranění velkého množství materiálu, a to zejména u aplikací, kde je vyžadováno velké vyložení nástroje, například při 3D frézování. Obrábění ponorným frézováním umožňuje využití nadstandardních řezných podmínek při vyložení nástrojů mnohokrát větším než při tradičních operacích. [8]

2.1 Druhy tvarových fréz

Mezi nejznámější frézy pro výrobu tvarových ploch se řadí:

- nástroje na frézování drážek (rybinové drážky, T-drážky),
- nástroje na frézování ozubených kol (odvalovací frézy, kotoučové frézy, čepové frézy),
- kulové frézy (pro kopírování, pro 3D CNC frézování, ponorné frézy).

Při frézování tvarových ploch používáme různých druhů tvarových fréz. Tvarovými frézami se většinou frézují krátké a jednoduché tvarové profily. Tvarovými frézami se na jeden záběr (průchod) ofrézuje celý tvarový povrch nebo jeho část. Pro tvarové plochy se v dnešní době nejvíce prosazují frézy s oblým břitem. Zvláště pro jejich výbornou vlastnost dosažení kvalitního povrchu obráběných součástí [9]. Kulové frézy dělíme na:

- frézy monolitní
- frézy ze slinutého karbidu
- frézy s výměnnými břitovými destičkami

2.1.1 Frézování kulovou frézou

V této práci se budeme zabývat frézováním kulovou frézou. Jedná se o nástroj, který je nejvhodnějším nástrojem pro frézování tvarově členitých a složitých ploch. V dnešní době moderní techniky není tímto nástrojem problém vyfrézovat prakticky jakoukoli zakřivenou plochu. Aplikace těchto nástrojů nabízí uživateli vysokou spolehlivost a hospodárnost při obrábění. Jedná se o vysoce produktivní, přesnou a velmi efektivní výrobu. Tyto typy fréz jsou mnohostranně využitelné. Při frézování tvarových ploch lze drsnost povrchu součástí do určité míry zlepšit nakloněním frézovacího kulového nástroje.



Obr.2.1 Monolitní kulová fréza

2.3 Uplatnění HSC při frézování tvarových ploch

Obrábění vysokými rychlostmi, suché obrábění a tvrdé obrábění patří mezi základní HSC technologie. Všechny tyto technologie mají společný základ, který vyplývá z příbuznosti jevů řezného procesu při zvyšování řezné rychlosti. Definice obrábění vysokými rychlostmi není jednoduchá, od aktuální řezné rychlosti, které může být dosaženo, až přes závislost na pracovním materiálu a typu řezné operace. Jednou jednoduchou definicí je, že řezná rychlost při HSC dosahuje 5 až 10x větších hodnot než při konvenčním obrábění pro určitou řeznou operaci. U frézování tvarových ploch je uplatnění HSC zvláště důležité, neboť tímto způsobem dochází k výraznému snížení výrobních časů, nízkému opotřebení nástroje a zajištění vyšší jakosti obráběných součástí.

HSC technologie zahrnuje kromě vlastního vysokorychlostního obrábění i tzv. suché a tvrdé obrábění. Suché obrábění sleduje vyloučení nebo minimalizaci užití procesních kapalin a redukci nákladů na jejich filtraci a recyklování. Tvrdé obrábění znamená obrábění kalených ocelí a jiných velmi tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu náhradou za dříve užívanou technologii broušení. [2]

2.3.1 Definice HSC

Při vysokorychlostním obrábění (High speed cutting – HSC) se teplota třísky blíží tavné teplotě obráběného materiálu. Tříska při průchodu střížnou rovinou náhle zvýší teplotu v celém svém průřezu. Změkne a sníží svou přítlakovou sílu na čelo nástroje. Třecí síla i celkový řezný odpor klesne, zvětší se úhel smykové roviny a ztenčí se průřez třísky a současně se zvýší rychlost jejího odchodu z kontaktní zóny. Z toho důvodu se sníží plocha kontaktní zóny a omezí se sekundární nárůst teploty třísky třením v kontaktní zóně. Vlivem vysoké odchozí rychlosti nestačí tříska předat teplo nástroji ani obrobku. Tím se minimalizuje přenos tepla do nástroje i obrobku a naprostá většina tepla odchází s třískou. Potom i přes celkově značný nárůst tepla se omezí opotřebení nástroje. Důsledkem poklesu řezných sil a snížením tepelného toku do obrobku stoupne i přesnost obrábění. Vysoká teplota třísky je tedy pozitivním faktorem i principiálním zdrojem efektů vysokorychlostního obrábění. [4]

3. Frézování nakloněným nástrojem

Při klasickém tříosém obrábění je osa nástroje pevná. Interpolace při obrábění prostorových ploch je realizována jen prostřednictvím tří lineárních pohybů, což je sice výrazně jednodušší způsob z hlediska programování NC dat, ale při nasazení kulových nástrojů v dokončovací etapě dochází k nepříznivým záběrovým podmínkám, které spolu s nulovou řeznou rychlostí v ose nástroje neblaze působí na celý řezný proces. Dochází zde k nežádoucím vlivům jako jsou:

- Pěchování třísky,
- Zvyšování teploty řezání,
- Zvýšená tvorba nárůstků apod.

Tyto jevy mají za následek zhoršení jakosti povrchu obráběného materiálu a snížení trvanlivosti nástroje, v nejhorším případě jeho vyštípnutí. Tyto negativa je možné eliminovat víceosým frézováním tzv. naklápěním nástroje ve směru 4. popř. 5. osy.

3.1 *Náklon nástroje o úhel β_r*

V této oblasti byly stanoveny velikosti úhlů naklápění pro HSC frézování tepelně zpracovaných nástrojových ocelí. Z hlediska opotřebení břitu, procesní spolehlivosti, přesnosti a drsnosti obráběné plochy bylo zjištěno jako optimální naklonění nástroje o 10° až 20° do směru posuvu (platí pro sousledné frézování) jedná se tedy o tzv. vlečení nástroje.

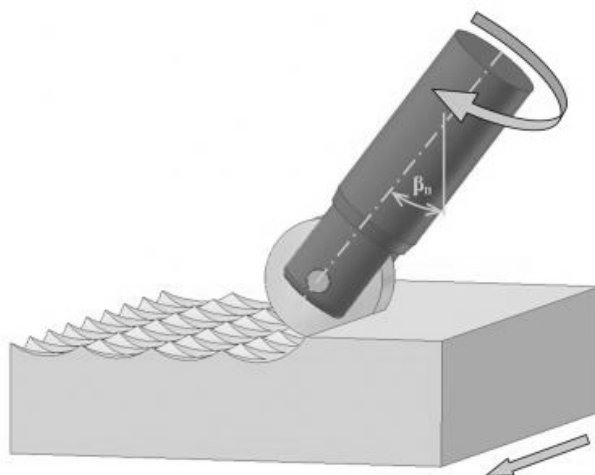
Velmi důležitým aspektem je rovněž směr posuvu nástroje. Pokud je způsob posuvu označován jako „tažený“, jedná se opravdu o zefektivnění celého procesu řezání, se zlepšující se kvalitou povrchu obráběného materiálu. Použijeme-li naopak způsob posuvu, kdy je nástroj „tlačený“, ve většině nedojde ke zlepšení kvality povrchu (z důvodu stále se vyskytující nulové řezné rychlosti v oblasti řezu) a ani ke zvýšení efektivní řezné rychlosti (tedy efektivního průměru frézy).

Efektivní řezný průměr u tlačeneho nástroje má i přes doporučený náklon menší efektivní průměr, než při použité metodě bez náklonu.

Z toho plyne menší řezná rychlost a zhoršené řezné podmínky. Proto je nutné při využití náklonu frézy respektovat polohu nástroje ve směru tažení. Také použití sousledného či nesousledného způsobu frézování má na jakost povrchu a životnost nástroje velký vliv. [1]

3.2 Náklon nástroje o úhel β_n

Sklon osy nástroje oproti normále k povrchu ve směru posuvu zapříčiní vznik mírného normálového napětí. Z těchto důvodů je výhodné použít (je-li to dle typu frézování možné) případný boční příklon nástroje k dosud neobrobenému povrchu. Při řádkování přináší útlum samobuzených kmitů a zvýšení produktivity obrábění až o 2/3 původních hodnot. Sklon nástroje má tedy stabilizující účinky díky efektivnímu tlumení samobuzeného kmitání svojí příznivou směrovou orientací, při které v nástroji převládají tahové síly, a při které má náhodné zvýšení síly řezání za následek odklon nástroje od obráběného materiálu. Vliv sklonu nástroje je zde rozhodující, neboť je v něm při malém poloměru soustředěna téměř veškerá prostorová poddajnost řetězce „toku síly“ od nástroje k obrobku. Tuto metodu obrábění lze využít přinejmenším na tříosých obráběcích centrech s možností naklonění čtvrté osy. Náklon nástroje o úhel β_n je použit i v našich experimentech [1].



Obr.3.1. Pozice nástroje vůči obrobku při naklonění o β_n [1]

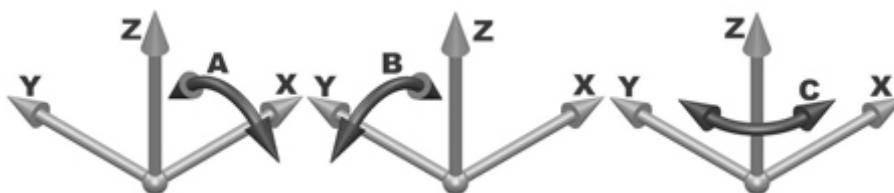
3.3 Použití 5-osých obráběcích center

Aplikací 5-osého obrábění s dvěmi rotačními osami pro vyklonění nástroje, nebo využitím náklonu obrobku, lze docílit efektivního obrobení zakřivené plochy, při využití efektivního radiusu nástroje. Touto metodou vzniká lepší drsnost povrchu, větší přesnost a v neposlední řadě se zkracuje celkový čas obrábění. 5-iosé obrábění umožňuje pro nejvhodnější obrábění stopkovou frézu s rádiusem v rohu kontinuálně regulovat naklápění nástroje s respektováním obráběného povrchu. Krok nástroje je generován pro specifickou výšku výstupků (drsnosti ve směru kolmém na posuv) s ohledem na co nejnižší hustotu těchto kroků. Standardní procedury pro 3-osé obrábění jsou nahrazovány mnohem dokonalejšími speciálními programy pro 5-osé obrábění, které dosahují vysoké kvality povrchu, použitím nejvhodnějšího směru řádkování a vysoké produktivity použitím nejvhodnějšího prostorového sklonu osy nástroje pro daný sklon obráběného povrchu [1].

Jsou časté případy firem vlastnicích 5-osé frézovací centra, které nedokáží plně využít výhod těchto obráběcích strojů. Problematika 5-osého obrábění je dosti složitá a programátoři tvořící programy pro tyto moderní obráběcí stroje nemají dostatek zkušeností pro komplexní a plné využití pohybu všech os současně. Samotné programování je velice obtížné a nesnadná je i automatická verifikace proti nebezpečí kolizí.

V praxi se setkáme s názory, že většina frézovaných dílů lze vyrobit 3-osým frézováním s použitím indexovaně naklápěných os. To je již otázkou pro praxi a některé výzkumné ústavy, které by vykonaly experimentální zkoušky 3-osých a 5-osých frézovacích obráběcích strojů prostřednictvím testovacích obrobků. [1]

3-osé stroje mají jen tři hlavní lineární osy X, Y a Z. Pětiosé stroje mají další dvě otočné osy, ve většině případů se tyto osy budou točit kolem jedné z hlavních os. Pojmenování těchto os se liší od výrobce k výrobcu, ale ve většině případů je pojmenování os následující:



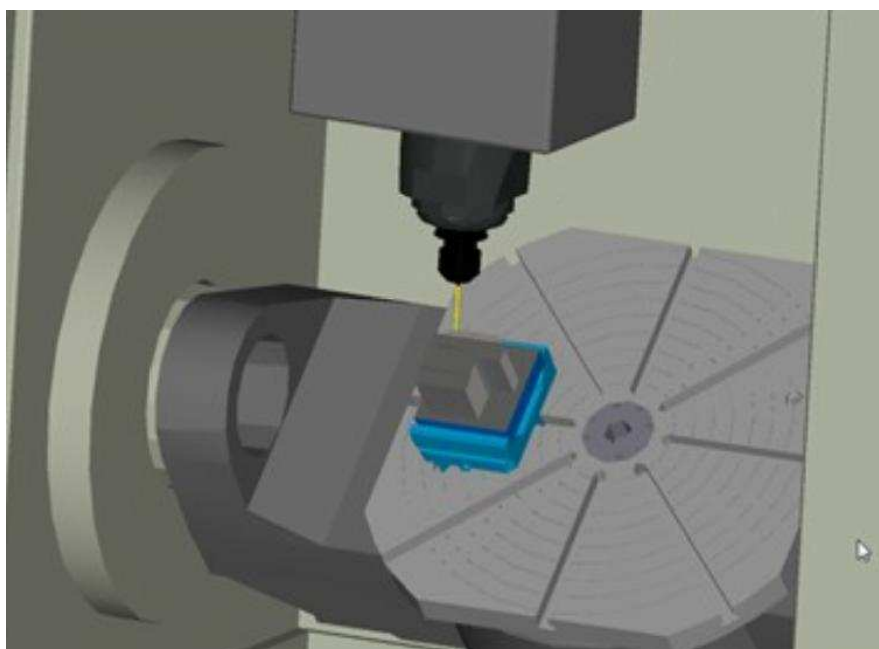
Obr.3.2. Pojmenování os

3.3.1 5-osé frézování polohováním

Při 5-osém polohovém obrábění jsou přidány další dvě rotační osy. To je často označováno jako 3+2 obrábění. Obrábění 3+2 odkazuje na tři lineární osy, které jsou ovládány současně a dvě osy rotační, pomocí kterých se hlava může přesunout na novou pozici a pak obrábět. Poté, co je hlava v nové pozici, provádí se klasické 3-osé obrábění. Tento typ obrábění může pohybovat pouze lineární osou nebo osou rotační (nelze tedy provádět oba pohyby za ráz). [10]

Tento typ frézování poskytuje mnoho výhod. Velká část obráběných ploch včetně podkosů může být obráběna při jediném upnutí. Tím se snižuje čas potřebný pro manipulaci s obrobkem a minimalizuje počet chyb.

Nakloněním nástroje k normále povrchu získáme lépe opracovanou součást. Použití kratších nástrojů zvyšuje tuhost stroje, snižuje deformaci plochy, dává obrobku lepší povrchovou úpravu a přesnost. [10]



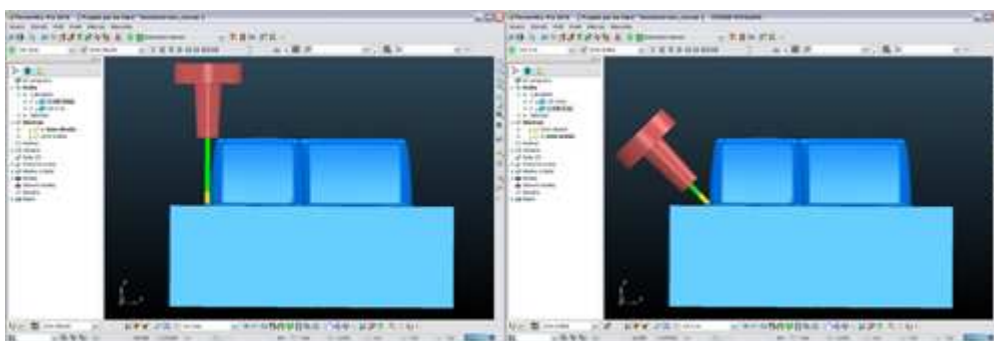
Obr.3.3. Zobrazení simulace 5-osého frézování v programu FeatureCAM

[10]

3.3.2 5-osé souvislé frézování

Obrábění pomocí souvislých (nebo také kontinuálních) 5 os umožňuje současný pohyb lineárních i rotačních os obráběcího stroje. Podle kinematiky stroje získáváme v NC programu kromě lineárních os X, Y, Z ještě rotační osy A, B, C. Celé obrábění probíhá v jedné pracovní rovině, bez ohledu na naklopení rotačních os.

Díky 5-osému souvislému obrábění jsme schopni obrábět tvary, které jsou v podkosu (nelze je obrobit ve 3 osách) bez nutnosti měnit upnutí obrobku v obráběcím stroji nebo měnit nulový bod obrábění. Osa nástroje se plynule může měnit tak, abychom vždy dosáhli obrobení celého tvaru při zachování požadované kvality povrchu. Také díky vyklonění nástroje lze zkrátit jeho vyložení, což vede k lepší kvalitě povrchu a prodloužení životnosti nástroje [10].

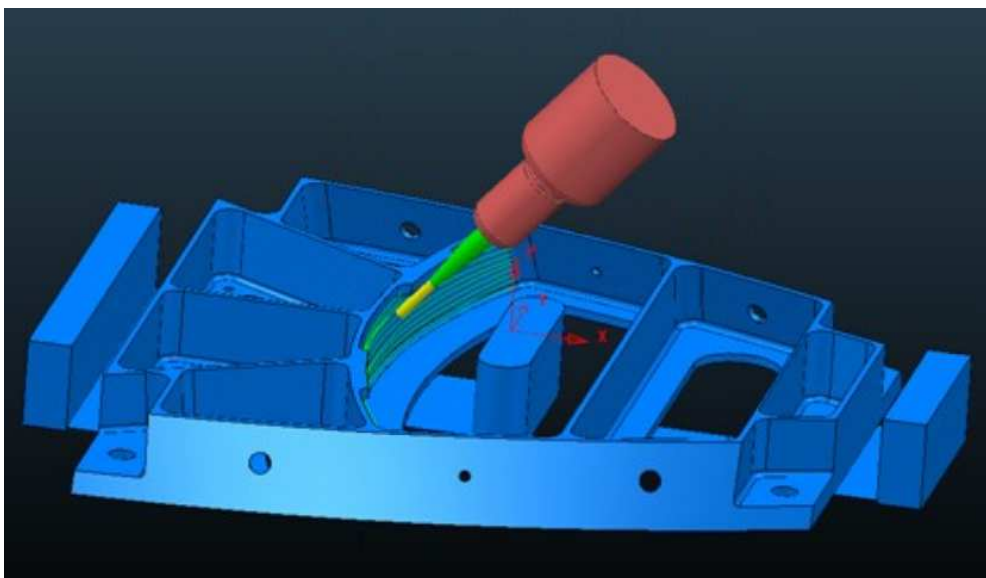


Obr.3.4. 5-osé frézování v programu PowerMILL [10]

Víceosé souvislé frézování vyžaduje použití CAM systému, který uživateli generuje NC program pro obrobení požadovaného tvaru. Velmi záleží na kvalitách CAM systému, protože prostředky, které systém nabízí, uživateli pomohou plně využít potenciál jeho frézovacího stroje. Moderní výkonné CAM systémy umožňují nastavit osu nástroje několika odlišnými způsoby, pro perfektní obrobení požadovaného tvaru. Mezi možnosti nastavení osy nástroje v CAM systémech patří pevné nastavení úhlu odklonu nástroje, řízení nástroje podle normály plochy nebo také řízení osy nástroje uživatelskými prvky jako je bod, přímka nebo křivka, které umožňují zcela variabilní nastavení sklonu nástroje i pro tvarově složité modely. Schopný CAM by měl kromě možností nastavení osy nástroje také poskytovat dostatek obráběcích strategií (technologií) pro perfektní obrobení různých částí modelu, aby vždy byla zabezpečena dobrá kvalita povrchu.

S tím souvisí možnosti použití tříosých obráběcích strategií i pro 5osé obrábění nebo převádět již spočítané 3osé dráhy na víceosé dráhy nástroje. Neméně důležitá je i možnost použití všech typů nástrojů, které nám CAM nabízí i pro 5-osé dráhy nástroje, protože se stále častěji využívají kuželové nebo tvarové nástroje, které zajišťují větší tuhost nástrojové sestavy a lepší řezné podmínky [10].

V posledních letech také přibývají funkce pro automatický odklon sestavy nástroje v místech, kde by hrozila kolize s obrobkem anebo možnosti pro vyhlazení osy nástroje, které eliminují zbytečné pohyby rotačních os obráběcího stroje, které prodlužují čas obrábění. U některých CAM systémů se také můžeme setkat se specializovanými technologiemi pro obrábění lopatkových kol, turbin nebo uzavřených kanálků. Takovéto funkce velmi zjednodušují a zrychlují celý proces programování 5 os souvisle a umožňují efektivní využití potenciálu obráběcího stroje. [10]



Obr.3.5. Tvorba víceosé dráhy nástroje při využití funkce pro automatické vyhnutí se překážce v programu PowerMILL [10]

4. Struktura povrchu

Geometrie povrchu je tvořena kombinací tří parametrů:

drsnost povrchu, která je důsledkem mikrostruktury materiálu a plastické deformace a je zároveň i nejčastěji a nejvíce sledovaným a kontrolovaným parametrem

vlnitost povrchu, která je důsledkem nestability obráběcího procesu a chybného ustavení nástroje; ve speciálních případech je možné řadit vlnitost jako odchylku tvaru

tvar povrchu, který je důsledkem chybného ustavení nástroje a tlakové deformace a je zároveň nejméně sledovaným parametrem

Struktura povrchu je jedním z důležitých kritérií jakosti výrobku, protože právě mikrogeometrie povrchu podmiňuje velmi výrazně životnost a spolehlivost provozu součásti stejně tak, jako i řadu spolusouvisejících parametrů, jako je např. hlučnost, opotřebení, atd.

Pro objektivní hodnocení jakosti povrchu se posuzuje stále více parametrů, které podávají mnohem konkrétnější a ucelenější obraz o kontrolované ploše z pohledu mikrogeometrie.

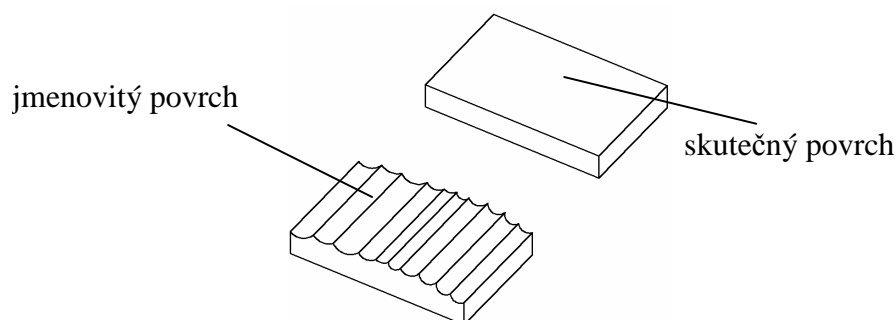
Při frézování je obrobený povrch tvořen stopami po řezných klínech nástroje. Mikrogeometrie frézovaného povrchu je ovlivněna kinematikou, konstrukcí nástroje a podmínkami tvorby třísky na jednotlivých řezných klínech. [3]

Jakosti povrchu a vlastnosti povrchové vrstvy ovlivňují průběhy fyzikálních a chemických jevů při obrábění v povrchové vrstvě materiálu. Životnost a spolehlivost každé součásti je ovlivněna především vlastnostmi mikrogeometrie, jejich povrchové vrstvy. Nejdůležitější je sledování a vyhodnocování mikrogeometrie povrchu, čímž napomáháme ke zvýšení kvality, jakosti a efektivnosti zejména u strojních součástí.

Tvary nerovností obrobených povrchů jsou velice rozmanité a liší se podle druhu použité metody obrábění.

4.1 Drsnost povrchu

Jedním z nejdůležitějších parametrů určujících výslednou jakost výrobku v oblasti metrologie je drsnost povrchu, která je hlavním činitelem při vzniku koroze pod napětím a vzniku únavového lomu, ke kterému dochází obvykle na povrchu nebo těsně pod povrchem součásti. Pro hodnocení jakosti strojních součástí má analýza drsnosti povrchu svůj neopomenutelný význam, na který je v metrologii a jakosti kladen stále větší důraz stejně tak, jako stále roste význam kontroly v systému řízení jakosti.



Obr. 4.1. Skutečný a jmenovitý povrch po frézování [2]

Drsnost povrchu je jednou z úchylek, které jsou chápány jako rozdíly skutečného tvaru plochy a tvaru plochy jmenovité. Tyto úchylky řadíme k hodnotám, které určují mikrogeometrii povrchu obrobené plochy. Mezi další patří např. úchylky tvaru, vlnitost, strukturální změny, apod. Všechny tyto úchylky povrchu vznikají v důsledku nedokonalosti a nepřesnosti při výrobě. Příčiny podmiňující mikrogeometrii povrchu lze rozdělit do několika skupin:

- mikrostruktura materiálu,
- plastická deformace, ke které dochází v průběhu obrábění,
- nestabilita obráběcího procesu v soustavě stroj – nástroj – obrobek,
- chybné ustavení nástroje,
- tlaková deformace.

Rozlišujeme výškové, délkové a tvarové parametry, přičemž nejfrekventovanější jsou parametry výškové. Nelze však používat jenom tyto parametry pro popis povrchu, protože při přesnějším zkoumání nepodávají přesnou charakteristiku povrchu.

Drsnost povrchu je hodnocena pomocí profilu drsnosti, který je definován dle ČSN EN ISO 4287 jako profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhových složek použitím filtru profilu λ_c ; profil je úmyslně pozměněn. Pro rozhodnutí, zda povrch je či není ve shodě se specifikací, je použit soubor jednotlivých hodnot parametru struktury povrchu, z nichž každý je určen na vyhodnocované délce. Vyhodnocovaná délka je označena l_n a je definována jako délka ve směru osy X, použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Další pojem, který je nezbytný při popisu profilu drsnosti je základní délka, definována jako délka ve směru osy X, použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil. Pro hodnocení profilu používáme tyto základní geometrické parametry [6]:

P - parametr : parametr vypočítaný ze základního profilu, vyhodnocovaná délka je rovna délce měřeného prvku,

R - parametr: parametr vypočítaný z profilu drsnosti, měřeno dotykovými přístroji a vyhodnocovaná délka je přesně stanovena normou (parametr, který budeme níže porovnávat u frézovaných vzorků),

W - parametr : parametr vypočítaný z profilu vlnitosti

4.2 Hodnocení struktury funkčních ploch jako celku

Hodnocení sledované plochy provádíme pomocí hodnot, které naměříme přístrojem na měření parametrů drsnosti na sledované ploše a následným porovnáním s hodnotami požadovanými pro funkčnost sledované plochy výkresem nebo výrobní dokumentací. Při hodnocení vycházíme z normy ČSN EN ISO 4288, která : stanovuje pravidla pro porovnávání měřených hodnot s tolerančními mezemi stanovenými pro parametry struktury povrchu v ISO 4287, ISO 12 085, ISO 13 565 – 2 a ISO 13 565 – 3. [6]

Sledovaný parametr přitom nabývá hodnoty s určitým rozptylem, s čímž výše citovaná norma počítá a stanovuje proto pravidlo 16%, které říká, že sledované plochy lze považovat za přijatelné, pokud: ne více než 16% všech naměřených hodnot sledovaných parametrů zjišťovaných na vyhodnocované délce přesáhne hodnotu danou výkresem nebo výrobní dokumentací. [6]

Bereme –li v úvahu hodnocení pomocí horní meze (hodnocení pro dolní mez lze odvodit obdobným způsobem), pak tuto horní mez v případě normálního rozdělení hodnot parametrů určíme jako hodnotu $\mu + \sigma$, kde μ je aritmetický průměr parametru profilu drsnosti a σ je směrodatná odchylka hodnot.

4.2.1 Porovnávání měřených hodnot s tolerančními mezemi

Podle pravidel normy ČSN EN ISO 4288 provedeme kontrolu homogenity povrchu. Je – li struktura povrchu homogenní, hodnoty parametrů určených z celého povrchu měřeného vzorku nebo obrobku budou použity pro porovnání s hodnotami uvedenými na výkresu, nebo ve výrobní dokumentaci.

Je – li povrch obrobku složen z několika různých ploch s různou strukturou, budou hodnoty parametrů hodnoceny na každé ploše odděleně podle výrobní dokumentace nebo požadavků na výkresu.

Pravidlo 16 %

Pravidlo 16 % uplatňujeme tehdy, jsou – li hodnoty drsnosti uváděny dolní nebo horní mezí parametru. Povrchy s horní mezí parametru jsou považovány za přijatelné, neleží – li více než 16 % naměřených hodnot vybraných parametrů zjišťovaných na vyhodnocované délce nad hodnotou uvedenou ve výrobní dokumentaci nebo na výkresu. Povrchy s dolní mezí parametru jsou považovány za přijatelné, neleží – li více než 16 % parametrů zjišťovaných na vyhodnocované délce pod hodnotou uvedenou ve výrobní dokumentaci nebo na výkresu.

Pravidlo maxima

Je – li drsnost specifikována na výkrese nebo ve výrobní dokumentaci největší hodnotou parametru, nesmí v průběhu kontroly žádná z měřených hodnot parametru na celém kontrolovaném povrchu přesáhnout tuto stanovenou hodnotu.

Nejistota měření

Nejistoty měření jsou uvažovány podle pravidel udaných v ISO 14253 – 1. V případě porovnávání výsledků měření s horními a dolními mezemi jsou nejistoty měření odhadovány bez uvážení nehomogenit povrchu, které jsou už započítány přídavkem 16 %.

4.2.2 Kontrola drsnosti dotykovými přístroji (dle ČSN EN ISO 4288)

Při kontrole drsnosti dotykovými přístroji platí pravidla, která stanoví norma ČSN EN ISO 4288 (014449), platná od března 1999.

Není – li specifikován směr měření, obrobek je polohován tak, že směr řezu odpovídá největším hodnotám výšek parametrů drsnosti (R_a , R_z). Tento směr bude kolmý k poloze povrchu. Pro izotropní povrchy může být směr libovolný.

Měření je provedeno na té části povrchu, na které lze očekávat kritické hodnoty; to může být posouzeno vizuálním pozorováním. Pro získání nezávislých výsledků jsou jednotlivá měření na této části povrchu rozdělena rovnoměrně. [6]

Jsou – li použity speciální postupy měření, musí být popsány ve specifikacích v protokolu o měření. [6]

Pro určení hodnot parametrů profilu drsnosti je potřeba nejprve pohledem rozhodnout, zda profil drsnosti je periodický nebo neperiodický. Poté se použije postup stanovený normou.

4.2.3 Zjednodušený postup pro kontrolu drsnosti

Uváděný postup je jen hrubým přiblížením se plnému postupu definovaném normou, ale v praxi ho lze velice dobře použít. Je pouze jednou z možností provádění kontroly.

Vizuální zkouška

Vizuální zkoušku provádíme tehdy, je – li zřejmé, že kontrola měřením není nutná, tzn. u povrchů, které mají drsnost zřejmě lepší nebo zřejmě horší než je drsnost specifikovaná. Nelze – li rozhodnout vizuální zkouškou, může být provedena zkouška hmatem nebo vizuálně pomocí srovnávacích vzorků.

Zkouška měřením

Nelze – li provést rozhodnutí po zkoušce porovnáváním, provedeme měření na té části povrchu, kde na základě vizuálního pozorování lze očekávat kritické hodnoty.

4.3 Funkční vlastnosti povrchu

Aby mohl obrobený povrch plnit požadovanou funkci, musí být vyrobený tak, aby odolával defektům. Defekt je stav povrchu charakterizující ukončení jeho schopnosti plnit požadovanou funkci. Nejčastějšími vnějšími projevy defektů jsou[9]: opotřebení, koroze, deformace a odtlačení, lomy a trhliny.

Zpevněná vrstva obrobeného povrchu vytváří předpoklady pro zlepšení její funkčnosti. Zvýšená tvrdost zvětšuje odolnost povrchu proti opotřebení a tím také přispívá k prodloužení životnosti strojní součásti. Významným faktorem, který zasahuje do funkčnosti obrobených ploch je mikrogeometrie obrobených ploch. V oblasti mikrogeometrie vznikají často zárodky únavových lomů. Drsnost povrchu je vázaná na rozměrovou přesnost uložení a závisí také na pevnosti lisovaných spojení. Drsnost povrchu má velký význam pro funkčnost povrchu, z toho důvodu zkoumání závislosti drsnosti povrchu na naklonění frézy přináší rozšíření poznatků v oblasti funkčnosti obrobených ploch.

Teoretický tvar povrchu se mění vlivem mnoha faktorů působících v procesu obrábění. Uvedené vztahy pro výpočet průměrné aritmetické hodnoty drsnosti povrchu v příčném i podélném směru při kopírovacím frézováním je možné zařadit do počítačové podpory optimalizace technologických parametrů. Rovnice mohou být využity pro simulaci vzniku teoretické drsnosti obráběného povrchu a jeho základ rozšíření poznatku o simulacích vzniku reálných povrchů [9].

Teoreticky vypočtené hodnoty drsnosti povrchu budou porovnány s výsledky naměřených hodnot drsnosti povrchu na zkoumaných vzorcích.

5. Vliv frézování nakloněným nástrojem na drsnost povrchu

Je všeobecně známo, že náklon nástroje při frézování kulovou frézou, má pozitivní vliv na drsnost obráběného povrchu. V minulosti již byl nalezen efektivní úhel náklonu. Tento úhel se pohybuje většinou v rozmezí 5 – 15 °. Při našich experimentech bylo toto tvrzení dokázáno, neboť u těchto úhlů byla zjištěna nejmenší odchylka naměřené drsnosti od drsnosti teoretické. Tato práce vychází z naměřených hodnot dle literatury [1].

5.1 Realizace experimentů

Při experimentech byly naměřeny hodnoty skutečných drsností povrchu za určitých podmínek. Frézování bylo provedeno ve 3 firmách na 3-osých obráběcích centrech při naklonění nástroje (4. osy). Pokusy byly prováděny v těchto společnostech:

AMF Reece CR, s.r.o. **Materiál: 14 220**

Společnost, se sídlem v Prostějově, která vyniká předním postavením na světovém trhu speciálních průmyslových šicích strojů. Vedoucí pozici si u oděvních podniků získala svým inovativním přístupem, vysokou kvalitou, spolehlivostí a zákaznickou podporou vyráběných produktů.

www.amfreece.com

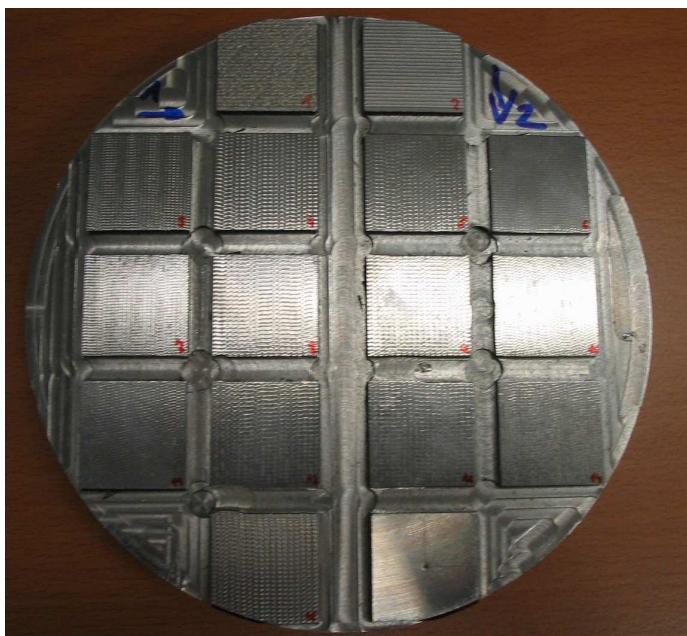
John Crane Sigma, a.s. **Materiál: 17 346**

Společnost John Crane Sigma, a.s., se sídlem v Lutíně, poskytuje kvalitní služby zákazníkům při výběru a dodávkách těsnících systému, mechanických ucpávek, spojek, mazacích systémů a ostatních produktů z portfolia John Crane. Na českém trhu působí John Crane Sigma od roku 1993. V současné době zaměstnává 260 zaměstnanců.

www.johncrane.co.uk

Společnost SIGMA 1868 s.r.o. vyrábí a dodává spotřební čerpadla pro dům a zahradu, průmyslová čerpadla pro čerpání znečištěných vod, viskózních médií ale i hořlavin, zejména ponorná kalová, horizontální jednovřetenová čerpadla, oběhová teplovodní čerpadla a od roku 2005 se prosazuje i v oblastech dodávek systémů tlakové kanalizace. V rámci podpůrných procesů disponuje vlastní slévárnou pro výrobu odlitků z neželezných kovů a pracovištěm tepelného zpracování (kalírny).

www.sigma1868.cz



Obr.5.1. Frézované vzorky - j, k (materiál X3CrNiMo13-4)



Obr.5.2. Frézované vzorky a, b, c, d (materiál: 14 220)

5.2 Řezné podmínky

materiál	vzorek	ap	d	n	vc	ae	fz	Rz př.	Rz po.
14 220		[mm]	[mm]	[min-1]	[m·min-1]	[mm]	[mm]	[μm]	[μm]
	a	0,3	10	6 685	210	0,1765	0,1765	0,78	0,78
	b	0,3	10	6 685	210	0,2497	0,2497	1,56	1,56
	c	0,3	16	4 178	210	0,2236	0,2236	0,78	0,78
	D	0,3	16	4 178	210	0,3157	0,3157	1,56	1,56

Tab.5.1. Řezné podmínky pro vzorky a,b,c,d (materiál: 14 220)

Materiál	vzorek	ap	d	n	vc	ae	fz	Rz př.	Rz po.
17 346		[mm]	[mm]	[min-1]	[m·min-1]	[mm]	[mm]	[μm]	[μm]
	e	0,3	10	3 150	99	0,249	0,249	1,56	1,56
	f	0,3	10	3 150	99	0,353	0,353	3,12	3,12
	g	0,3	20	2 500	157	0,499	0,25	3,12	0,781
	h	0,3	20	2 500	157	0,499	0,353	3,12	1,56

Tab.5.2. Řezné podmínky pro vzorky e,f,g,h (materiál: 17 346)

Materiál	vzorek	ap	d	n	vc	ae	fz	Rz př.	Rz po.
X3CrNiMo13-4		[mm]	[mm]	[min-1]	[m·min-1]	[mm]	[mm]	[μm]	[μm]
	j	0,3	10	3 150	99	0,249	0,249	1,56	1,56
	k	0,3	25	1 950	153	0,558	0,558	3,12	3,12

Tab.5.3. Řezné podmínky pro vzorky j,k (materiál X3CrNiM13-4)

5.3 Naměřené hodnoty

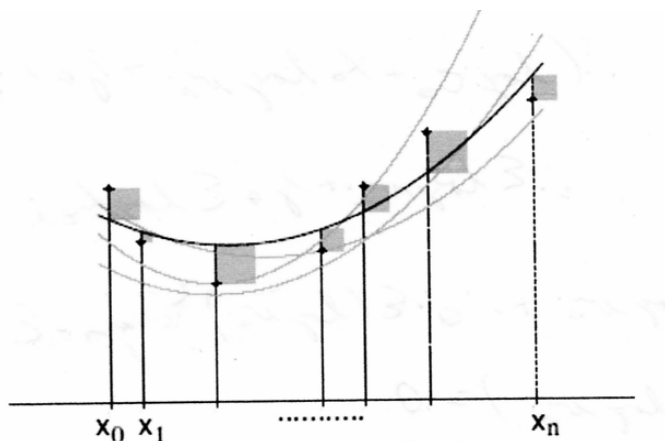
V našich výpočtech budeme vycházet pouze z naměřených drsností typu Rz. A to z důvodu velkého množství dat, které by jsme zde z důvodu rozsahu práce nevyužili. Tato práce má pouze nastínit postup, který bude použit pro další pokusy. Za poskytnutí naměřených hodnot, bych chtěl především poděkovat panu Ing. Marku Sadílkovi, Ph. D.

Materiál:	14 220				17 346				X3CrNiMo13-4	
Vzorek:	a	b	c	d	e	f	g	h	j	k
Úhel [°]:	Rz [μm] příčně									
5	4,61	7,38	3,58	4,37	5,55	7,16	4,13	4,24	3,71	4,23
10	3,30	4,82	4,89	4,32	4,78	5,56	3,59	3,43	3,34	4,17
15	3,03	3,46	4,08	5,00	4,32	4,80	3,65	3,53	3,67	4,60
20	3,77	5,19	4,32	6,09	6,16	6,18	3,46	3,65	4,67	5,26
25	5,12	7,84	5,25	7,76	4,56	6,19	3,89	3,83	4,79	5,20
30	5,06	7,18	9,15	12,80	6,72	8,17	5,49	5,21	5,31	5,57
Úhel [°]:	Rz [μm] podélně									
5	4,55	4,58	4,01	6,27	5,75	7,47	4,42	4,73	2,88	3,69
10	3,28	4,32	6,57	5,26	5,32	5,55	3,85	3,97	2,48	3,74
15	3,81	5,04	2,74	4,31	4,37	4,67	1,92	3,17	2,39	3,29
20	4,35	4,95	3,69	4,71	7,27	7,42	2,32	3,26	2,45	3,07
25	5,54	6,88	3,62	4,89	5,46	7,29	3,72	3,53	2,41	3,57
30	6,50	7,94	4,45	4,90	4,64	6,38	4,61	5,55	4,08	4,04

5.4 Tvorba strukturních rovnic pomocí metody nejmenších čtverců

Metoda nejmenších čtverců hledá řešení, které zaručí, že součet druhých mocnin chyb nalezeného řešení bude minimální. Jinými slovy metoda hledá takové hodnoty koeficientů, aby součet čtverců odchylek jejich funkčních hodnot od daných naměřených hodnot byl co nejmenší možný.

Na obr.5.3 je schéma metody nejmenších čtverců pro funkci paraboly, kde je hledána ta funkce paraboly, pro kterou je součet obsahů čtverců nejmenší možný.



Obr.5.3 Schéma metody nejmenších čtverců [11]

Pro výpočet pomocí metody nejmenších čtverců budeme vycházet ze statistické rovnice teploty řezání, kterou upravíme do logaritmického tvaru. Pro vytvoření statistické rovnice teploty řezání musíme vypočítat konstantu C_Θ a exponenty y_Θ , z_Θ .

Řešení statistické rovnice teploty řezání:

$$\Theta = C_\Theta \cdot a_p^{x_\Theta} \cdot f^{y_\Theta} \cdot v^{z_\Theta} \quad [5.1]$$

Naše ideální statistická rovnice drsnosti povrchu má tvar:

$$R_z = A \cdot \beta_n^x \cdot a_e^y \cdot v_c^z \cdot D^v \cdot f_z^w \quad [5.2]$$

Pro naše účely bereme jako neznámou úhel naklonění β_n , šířku řezu a_e v příčném směru a posuv f_z v řezu podélném. Proto rovnici zjednodušíme do tvaru:

$$Rz_{př.} = A \cdot \beta_n^x \cdot a_e^y \quad \text{- pro směr příčný} \quad [5.3]$$

$$Rz_{po.} = A \cdot \beta_n^x \cdot f_z^y \quad \text{- pro směr podélný.} \quad [5.4]$$

Statistická rovnice drsnosti povrchu v logaritmickém tvaru:

$$\log Rz = \log A + y \cdot \log a_e + x \cdot \log \beta_n \quad [5.5]$$

Součet čtverců odchylek se rovná minimální hodnotě:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 &= \sum_{i=1}^n (\log Rz - \log Rz_i)^2 = \min \\ \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 &= \sum_{i=1}^n (\log A + y \cdot \log a_e + x \cdot \log \beta_n - \log Rz_i)^2 = \min \end{aligned} \quad [5.6]$$

Derivací této funkce získáme tři rovnice o třech neznámých, z kterých vypočítáme konstantu A a exponenty x, y.

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{\partial \log A \cdot \partial y_{\Theta} \cdot \partial z_{\Theta}} = 0 \quad [5.7]$$

$$1. \quad n \cdot \log A + y \sum_{i=1}^n \log a_{ei} + x \sum_{i=1}^n \log \beta_{ni} - \sum_{i=1}^n \log Rz_i = 0 \quad [5.8]$$

$$2. \quad \log A \cdot \sum_{i=1}^n \log a_e + y \sum_{i=1}^n (\log a_e)^2 + x \sum_{i=1}^n \log \beta_{ni} \cdot \log a_e - \sum_{i=1}^n \log Rz_i \cdot \log a_e = 0 \quad [5.9]$$

$$3. \quad \log A \cdot \sum_{i=1}^n \log \beta_n + y \sum_{i=1}^n \log a_e \cdot \log \beta_n + x \sum_{i=1}^n (\log \beta_{ni})^2 - \sum_{i=1}^n \log Rz_i \cdot \log \beta_{ni} = 0 \quad [5.10]$$

V našich výpočtech nebudeme pracovat s nulovým náklonem nástroje β_n . A to ze dvou důvodů. Nula zde vykazuje jisté jevy matematického charakteru. A při nulovém úhlu β_n byly naměřeny hodnoty drsnosti, které se podstatně liší od naměřených drsností pro ostatní úhly naklonění.

Nyní si dosadíme do rovnic naměřené a vypočítané hodnoty viz tab. 5.1 a 5.2. a určíme konstantu A a exponenty x, y.

měření č.:	B _n	f _z	R _z	log β_n	log f _z	log R _z
1	5	0,18	4,61	0,70	-0,75	0,66
2	10	0,18	3,30	1,00	-0,75	0,52
3	15	0,18	3,03	1,18	-0,75	0,48
4	20	0,18	3,77	1,30	-0,75	0,58
5	25	0,18	5,12	1,40	-0,75	0,71
6	30	0,18	5,06	1,48	-0,75	0,70
7	5	0,25	7,38	0,70	-0,60	0,87
8	10	0,25	4,82	1,00	-0,60	0,68
9	15	0,25	3,46	1,18	-0,60	0,54
10	20	0,25	5,19	1,30	-0,60	0,71
11	25	0,25	7,84	1,40	-0,60	0,89
12	30	0,25	7,18	1,48	-0,60	0,86
13	5	0,22	3,58	0,70	-0,65	0,55
14	10	0,22	4,89	1,00	-0,65	0,69
15	15	0,22	4,08	1,18	-0,65	0,61
16	20	0,22	4,32	1,30	-0,65	0,64
17	25	0,22	5,25	1,40	-0,65	0,72
18	30	0,22	9,15	1,48	-0,65	0,96
19	5	0,32	4,37	0,70	-0,50	0,64
20	10	0,32	4,32	1,00	-0,50	0,64
21	15	0,32	5,00	1,18	-0,50	0,70
22	20	0,32	6,09	1,30	-0,50	0,78
23	25	0,32	7,76	1,40	-0,50	0,89
24	30	0,32	12,80	1,48	-0,50	1,11
Σ	420,00	5,79	132,36	28,20	-15,04	17,14

Tab.5.1. Naměřené a vypočítané hodnoty

měření č.:	$(\log \beta_n)^2$	$(\log f_z p)^2$	$\log \beta_n \cdot \log f_z$	$\log R_z \cdot \log \beta_n$	$\log R_z \cdot \log f_z$
1	0,49	0,57	-0,53	0,46	-0,50
2	1,00	0,57	-0,75	0,52	-0,39
3	1,38	0,57	-0,89	0,57	-0,36
4	1,69	0,57	-0,98	0,75	-0,43
5	1,95	0,57	-1,05	0,99	-0,53
6	2,18	0,57	-1,11	1,04	-0,53
7	0,49	0,36	-0,42	0,61	-0,52
8	1,00	0,36	-0,60	0,68	-0,41
9	1,38	0,36	-0,71	0,63	-0,33
10	1,69	0,36	-0,78	0,93	-0,43
11	1,95	0,36	-0,84	1,25	-0,54
12	2,18	0,36	-0,89	1,26	-0,52
13	0,49	0,42	-0,45	0,39	-0,36
14	1,00	0,42	-0,65	0,69	-0,45
15	1,38	0,42	-0,77	0,72	-0,40
16	1,69	0,42	-0,85	0,83	-0,41
17	1,95	0,42	-0,91	1,01	-0,47
18	2,18	0,42	-0,96	1,42	-0,63
19	0,49	0,25	-0,35	0,45	-0,32
20	1,00	0,25	-0,50	0,64	-0,32
21	1,38	0,25	-0,59	0,82	-0,35
22	1,69	0,25	-0,65	1,02	-0,39
23	1,95	0,25	-0,70	1,24	-0,45
24	2,18	0,25	-0,74	1,64	-0,55
Σ	34,80	9,63	-17,68	20,55	-10,59

Tab.5.2 Naměřené a vypočítané hodnoty

Dosazením vypočtených hodnot do 3 výše uvedených rovnic 5.8, 5.9 a 5.10, dostáváme soustavu rovnic o třech neznámých:

$$\begin{aligned}
 24 \log A - 15,04y - 28,2x - 17,14 &= 0 \\
 -15,04 \log A + 9,63y + 17,68x + 10,59 &= 0 \\
 28,2 \log A - 17,68y + 34,8x + 17,68 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{5.12}$$

Soustava rovnic byla řešena v programu Ms Excel pomocí matic a dostali jsme tyto hodnoty :

$$A = 0,7575$$

$$x = 0,2502$$

$$y = 0,8897$$

Konstantu a exponenty dosadíme do obecné statistické rovnice (5.13) a dostaneme strukturní rovnici (5.14) pro zkoumaný materiál 14 220:

$$Rz = A \cdot \beta_n^x \cdot a_e^y \quad [5.13]$$

$$Rz_{př.} = 0,7575 \cdot \beta_n^{0,2502} \cdot a_e^{0,8897} \quad [5.14]$$

V následující tabulce vidíme hodnoty Rz naměřené a hodnoty Rz vypočtené ze strukturní rovnice pro příčnou drsnost povrchu u materiálu 14 220:

β_n [°]	a_e [mm]	$Rz_{př.}$ [μm]	$Rz_{př.}$ [μm]
		naměřená	vypočtená
5	0,18	4,61	3,16
10	0,18	3,30	3,76
15	0,18	3,03	4,16
20	0,18	3,77	4,47
25	0,18	5,12	4,73
30	0,18	5,06	4,95
5	0,25	7,38	4,10
10	0,25	4,82	4,88
15	0,25	3,46	5,40
20	0,25	5,19	5,80
25	0,25	7,84	6,14
30	0,25	7,18	6,42
5	0,22	3,58	3,78
10	0,22	4,89	4,49
15	0,22	4,08	4,97
20	0,22	4,32	5,34
25	0,22	5,25	5,65
30	0,22	9,15	5,91
5	0,32	4,37	4,89
10	0,32	4,32	5,82
15	0,32	5,00	6,44
20	0,32	6,09	6,92
25	0,32	7,76	7,31
30	0,32	12,80	7,66

Tab.5.3. Vypočtené hodnoty pomocí strukturní rovnice

Stejným způsobem jsme našli strukturní rovnice, pro další námi měřené materiály:

Materiál 14 220:

$$Rz_{př.} = 0,7575 \cdot \beta_n^{0,2502} \cdot a_e^{0,8897} \quad [5.15]$$

$$Rz_{po.} = 5,7484 \cdot \beta_n^{0,0672} \cdot f_z^{0,2597} \quad [5.16]$$

Materiál 17 346:

$$Rz_{př.} = 2,5476 \cdot \beta_n^{0,0575} \cdot a_e^{-0,4938} \quad [5.17]$$

$$Rz_{po.} = 9,2932 \cdot \beta_n^{-0,0401} \cdot f_z^{0,4896} \quad [5.18]$$

Materiál X3CrNiMo13-4

$$Rz_{př.} = 3,5861 \cdot \beta_n^{0,1950} \cdot a_e^{0,4012} \quad [5.19]$$

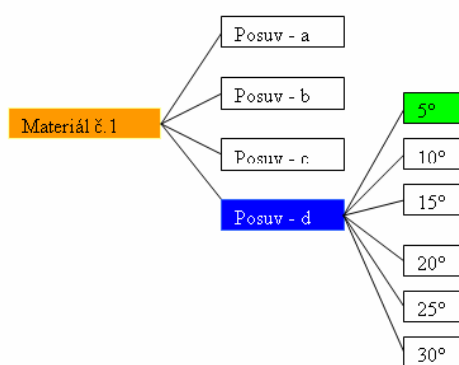
$$Rz_{po.} = 5,0609 \cdot \beta_n^{0,0338} \cdot f_z^{0,7641} \quad [5.20]$$

Jako příklad si uvedeme výpočet $Rz_{př.}$ při úhlu náklonu $\beta_n = 5^\circ$ a šířce řezu $a_p = 0,32$ mm u materiálu 14 220.

$$Rz_{př.} = 0,7575 \cdot 5^{0,2502} \cdot 0,32^{0,8897} \quad [5.21]$$

$$Rz_{př.} = 4,89 \mu m \quad [5.22]$$

Naměřená drsnost uvedená v tabulce 5.3: $Rz_{př.} = 4,37 \mu m$



Obr. 5.4. Schéma výpočtu

Statistickou strukturní rovnici je možné využít i pro stanovení optimální šířky řezu (posuvu) nebo úhlu naklonění pro zvolenou hodnotu drsnosti povrchu. Úprava pro zjištění optimální šířky řezu (posuvu) je uvedena zde:

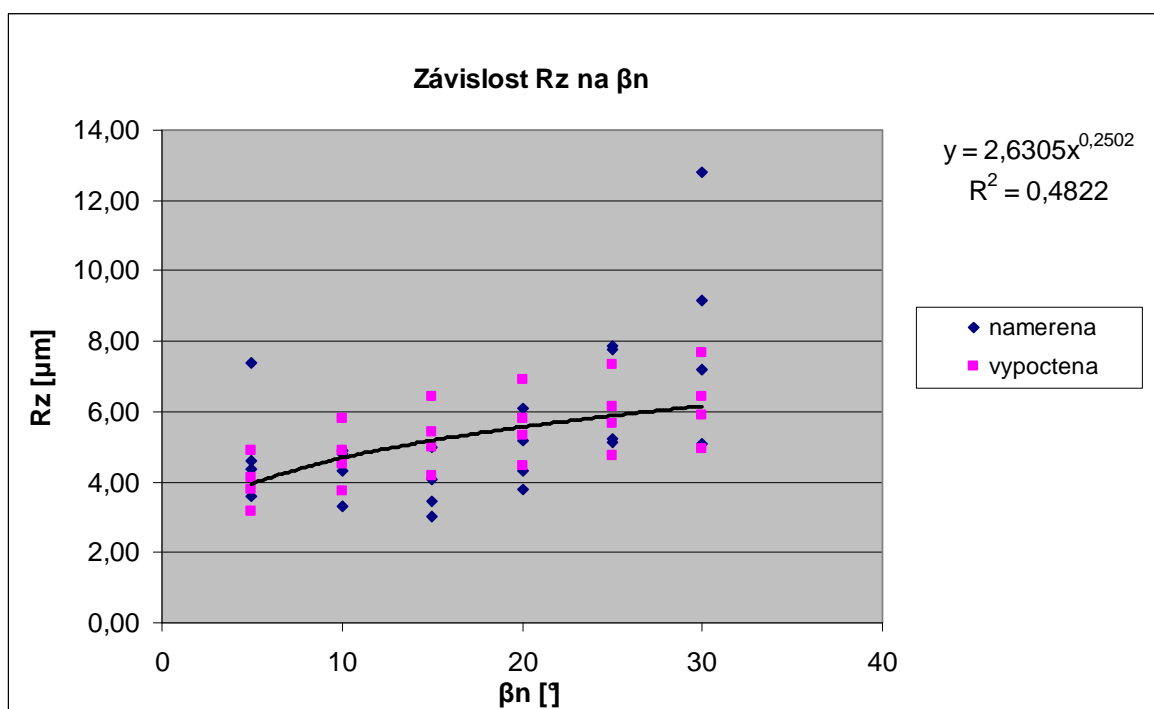
$$\beta_n = \left(\frac{Rz}{A \cdot a_e (f_z)^y} \right)^{\frac{1}{x}} \quad [5.23]$$

Podobně upravíme tuto rovnici pro zjištění optimální šířky řezu resp. posuvu:

$$a_e(f_z) = \left(\frac{Rz}{A \cdot \beta_n^x} \right)^{\frac{1}{y}} \quad [5.24]$$

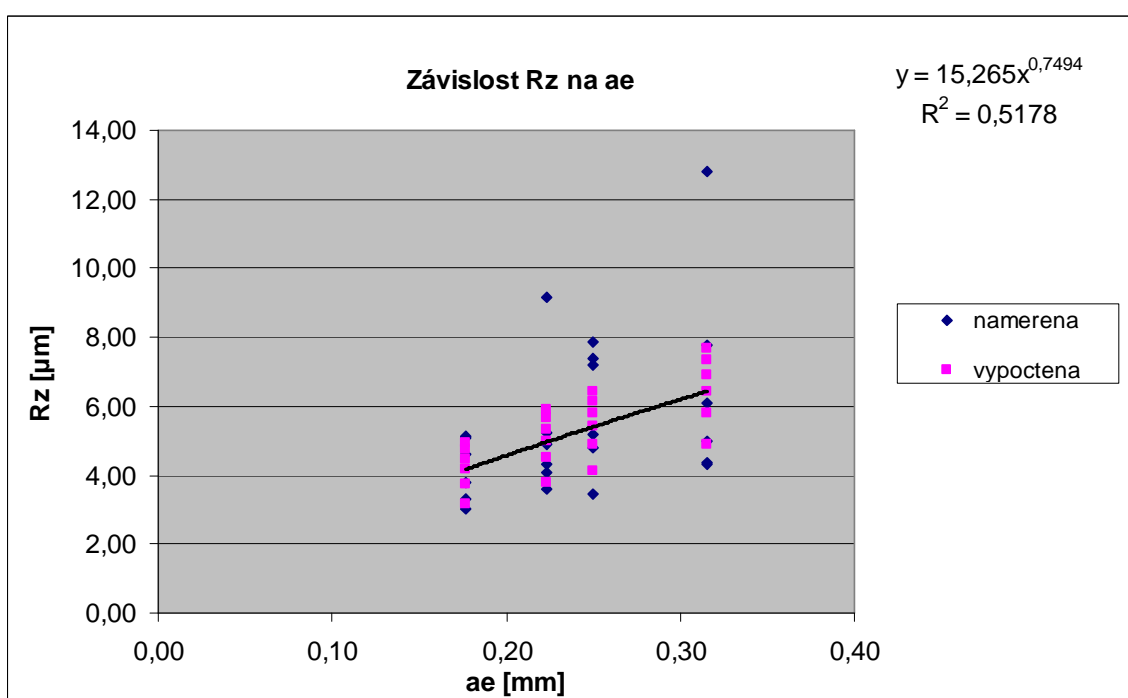
5.5 Neshoda naměřených hodnot s vypočtenými

Z údajů zaznamenaných v tabulce 5.3 si vytvoříme graf 5.1. Většina naměřených hodnot drsností Rz odpovídajících k určitým úhlům β_n je odlišná od drsností vypočítaných. Extrém je vidět u úhlu 30°. Mocninná křivka vytvořená z těchto údajů je ovlivněná i těmito zkreslujícími hodnotami. Proto je její tvar nepřesný vzhledem k ostatním vstupním podmínkám, které bychom do této rovnice dosazovali. Tento fakt je číselně vyjádřen koeficientem korelace R^2 jako slabá závislost.



Graf 5.1. Závislost Rz naměřené a vypočtené na úhlu β_n pro materiál 14 220

Nízký koeficient korelace je i v grafu 5.2, kde je znázorněna závislost drsnosti R_z na šířce řezu a_e . Pro vyřešení těchto obtížností se nabízí možnost vyloučení vstupních hodnot které na grafu vidíme jako extrémní z výpočtu v metodě nejmenších čtverců. Tímto by nám ale vznikla podmínka, která by nám zakazovala dosazení těchto hodnot do strukturní rovnice pro daný materiál. Zároveň bychom museli určit podmínky pro obě vstupní hodnoty (β_n , a_e), které jsou na sebe závislé a tímto by se nám celý proces pro určení společné strukturní rovnice zkomplikoval.



Graf 5.1. Závislost R_z naměřené a vypočtené na úhlu a_e pro příčný směr materiálu 14 220

Dále je zde možnost že extrémní hodnoty, které nám ovlivňují celý tvar rovnice, byly špatně naměřeny. Dopustili jsme se tedy hrubé chyby měření a celý proces by musel proběhnout od začátku (měření, vytvoření tabulek, výpočet strukturních rovnic). Jelikož s touto možností nepočítáme, dospějeme k závěru, že strukturní rovnice pro daný materiál za těchto podmínek není možné určit.

6. Závěr

Naším úkolem bylo zjistit tvar strukturních rovnic drsnosti povrchu. Měli jsme k dispozici 3 materiály, u kterých bylo provedeno obrábění a následné měření. Nejlepšího stavu bychom dosáhli, kdyby byla pro každý materiál vytvořena jedna rovnice. Tato rovnice by měla takový tvar, abychom s její pomocí mohli efektivně určit hodnotu drsnosti R_z při libovolně zadaných hodnotách šířky řezu a_e (posuvu f_z) a úhlu naklonění frézy β_n .

Při tvorbě strukturních rovnic jsme postupovali dle metody nejmenších čtverců. Vzorový výpočet jsme provedli na materiálu 14 220 v příčném směru. Jako neznámou jsme si zvolili úhel β_n a šířku řezu a_e (f_z). Šířku řezu proto, neboť se s každým vzorkem liší a ostatní řezné podmínky jako je řezná rychlost, průměr nástroje, otáčky atd. jsou ve většině případech konstantní. Podmínky jsme zadali do programu Ms excel a naší zvolenou metodou vypočítali konstantu A a exponenty x , y . Tento postup jsme opakovali pro všechny 3 materiály. Na závěr nám pro každý materiál vznikly 2 rovnice. První pro příčný směr frézovaného povrchu, druhá pro směr podélný.

Pro kontrolu jsme si do těchto rovnic dosadili všechny naměřené hodnoty. Zjistili jsme však, že se tyto hodnoty rapidně liší. To znamená, že jestliže zadáme do naší strukturní rovnice řezné podmínky, pro které chceme vypočítat drsnost, výsledek bude zkreslený, v nejhorších případech zcela špatný.

Jak již bylo uvedeno v praktické části, tvar rovnic je značně ovlivněn rozdílem mezi hodnotami naměřenými a vypočtenými. Proto tyto strukturní rovnice nemůžeme považovat za výsledné. Alternativním řešením by bylo vytvoření rovnic pro každý měřený vzorek materiálu zvlášť, tedy i pro každý posuv. Tímto bychom ale nedosáhli našeho cíle, který spočívá ve vytvoření jedné rovnice pro jeden materiál. Jako neznámou bychom dosazovali pouze úhel náklonu β_n a naše práce by tímto ztratila veškerý smysl, neboť by se naměřená drsnost rovnala drsnosti vypočtené.

Z těchto skutečností vyplývá, že výsledky, ke kterým jsme došli, nejsou konečné. Mohlo by se zdát, že naše práce byla zbytečná, protože jsme nevyřešili náš zadaný problém. Při určování strukturních rovnic, pro námi měřené materiály, jsme ale postupovali zcela správně. Tímto je možné říci, že strukturní rovnice pro drsnost povrchu nelze z těchto řezných podmínek a zadaných úhlů vytvořit. Rovnice, které jsou uvedeny na konci kapitoly 5.4 jsou nepoužitelné. Neboť při dosazení námi zvolených libovolných hodnot (šířky řezu a úhlu naklonění) vyvodíme drsnost povrchu, která ve většině případech vůbec neodpovídá drsnosti naměřené.

Závěrem tedy hodnotíme výsledek naší práce za neuspokojivý. Cílové strukturní rovnice jsme nebyli schopni nalézt. Za hlavní příčinu lze považovat nevhodnou volbu řezných podmínek uplatněných v rovnicích. Těmito jsou šířka řezu nebo posuv při frézování. Při dalších pokusech by bylo vhodné doporučit jiné řezné podmínky, které by byly pro každý vzorek odlišné. Například řezná rychlost, otáčky, průměr nástroje atd. Náš neúspěch je tedy částečně odůvodněn. Z toho plyne, že tato práce poslouží jako návod, nebo jakési ponaučení, pro další výzkum v tomto oboru a problematice. Pro budoucí experimenty jsou všechny tyto informace nesmírně důležité.

7. Seznam použité literatury

- [1] SADÍLEK, Marek. *Zvyšování efektivnosti obrábění s využitím CAD/CAM systému*. Vyd. 1. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. 42 s. ISBN 80–248–086–6.
- [2] OTÁHAL, Daniel. *Progresivní metody frézování a jejich vliv na proces řezání*. Vyd. 1. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. 40 s. ISBN–97-80–248–1455-1
- [3] TICHÁ, Šárka. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE : část 1*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. 112 s. ISBN 80-248-0671-1.
- [4] SKOPEČEK, Tomáš. *Příspěvek k optimalizaci obrábění forem a zápusťek z tepelně zpracovaných nástrojových oceli „HSC – TVRDÉ FRÉZOVÁNÍ“*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005.
- [5] ZEMAN, P., ŠAFEK J., VANĚČEK D. *Technologie HSC*. Fakulta strojní, ČVUT Praha, Web: <<http://technik.ihned.cz>>
- [6] DOSTÁL, Petr. *Integrita povrchu frézovaných tvarových ploch*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007.
- [7] VASILKO, Karol. *Analytická teória trieskového obrábania* . Prešov: Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach, so sídlom v Prešove, 2007. 338 s. ISBN: 978-80-8073-759-7
- [8] MM Průmyslové spektrum *Výroba-obrábění*. Nástroje pro 3D frézování Firma Seco 03/2006, Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com> >
- [9] BRYCHTA, J, *Obrábění 1. 2.díl*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1998. 1. vydání, 120s. ISBN 80-7078-470-9
- [10] 5-osé frézování: Web: <http://www.frezovani-5os.cz/clanky/>
- [11] KOVAŘÍK, M, *Vliv řezných podmínek na teplotu řezné hrany při soustružení Oceli*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008.